

**НОВАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЯ ВАРИАЦИЙ  
СКОРОСТИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ И ДИНАМИКИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ**

**A NEW METHOD OF RESEARCH AND COMPARISON OF VARIATIONS OF  
SEISMOTECTONIC MOVEMENT RATE AND ELECTRIC FIELD DYNAMICS  
IN THE NEAR GROUND AIR**

*В.А. Широков, О.П. Руленко*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

Novelty of a method of appraisal of speed seismo-tectonic motion  $U$  is based on the use sun-daily component of seismic process. In typical conditions for subduction zones changes of phase of a relative compression-decompression of lithosphere increase  $U$  corresponds to growth of pressure of compression and decrease - to a relative stretching. It is found out, that during short-term preparation of strong earthquakes value  $U$ , as a rule, essentially grows. The new method of the analysis of dynamics of a gradient of potential of electric field  $V'$  in the near-ground air based on use of synchronous registration on twopoints is developed also. It consists in consideration of a difference of standardized values  $V'$ , received on these points. On an example of observations which have been carried out on Southern Kamchatka in july-october 2006, comparison of variations  $U$  and differences of standardized values  $V'$  is executed. Linear connection of these parameters and satisfactory concurrence in their time extremuma is found out. It is marked, that the maximal values of parameters were observed 1 - 3 weeks before the strongest earthquake of Southern Kamchatka with magnitude  $M_w$  (NEIC) = 6,5. The received results evidence to significant influence of processes in lithosphere on dynamics of an electric field in near-ground air.

**Введение**

В июне-октябре 2006 г. на геофизическом полигоне ИКИР ДВО РАН проводились синхронные измерения электрического поля в приземном воздухе на обсерваторском пункте "Паратунка" и пункте "Микижа", расстояние между которыми 2.9 км. В этот период в районе Южной Камчатки, на расстоянии 220 км от пунктов наблюдений, 24 августа произошло землетрясение с моментной магнитудой  $M_w = 6.5$  (данные NEIC GS USA), наиболее сильное на Камчатке в 2006 г. Представляется целесообразным исследовать связь динамики электрического поля с сейсмичностью района Южной Камчатки.

Для характеристики сейсмического процесса обычно пользуются оценками параметров долговременного сейсмического режима. К их числу относятся сейсмическая активность ( $A$ ), максимально возможные для соответствующих сейсмоактивных зон энергетический класс ( $K_{\text{макс}}$ ) и магнитуда ( $M_{\text{макс}}$ ) землетрясений, наклон графика повторяемости землетрясений ( $\gamma$ ) по величинам  $K$ . Ю.В. Ризниченко [11, 12] ввёл интегральную характеристику сейсмичности, именуемую скоростью сеймотектонического движения ( $W$ ), которая зависит от перечисленных выше параметров сейсмического режима.  $W$  является осреднённой долговременной (годы) характеристикой деформаций сжатия и растяжения сейсмоактивного объёма [13]. На наш взгляд, представляет интерес изучение вариаций  $W$  на временных интервалах длительностью несколько месяцев. Например, в работе [17] показано, что примерно за месяц до начала сильных извержений вулканов Камчатки в области промежуточных глубин очагов землетрясений 70-300 км  $W$  увеличивается на 1-2 порядка по сравнению с долговременным фоном.

Задача настоящей работы заключается в кратком описании усовершенствованной методики оценки параметра  $W$ , использовании модифицированного параметра  $W$  для оценок изменения скорости сеймотектонического движения во времени, а также в сравнении вариаций  $W$  с динамикой электрического поля в приземном воздухе по

наблюдениям на двух пунктах в июне-октябре 2006 г. Раздел 1 подготовлен В.А. Широковым, раздел 2 – О.П. Руленко.

### 1. Новая методика расчёта вариаций скорости сейсмотектонического движения для решения задач геодинамики и прогноза землетрясений.

Прежде чем описать новый методический подход к оценке скорости сейсмотектонического движения  $W$ , изложим в кратком виде методику определения этого параметра автором метода Ю.В. Ризниченко. В соответствии с его подходом [11, 12] скорость деформации изменения длины, например, по вертикальной оси  $z$  равна

$$W = \alpha W_1 = (\cos^2 \varphi_{\text{раст}} - \cos^2 \varphi_{\text{сж}}) W_1 \text{ год}^{-1},$$

где  $\varphi_{\text{раст}}$  и  $\varphi_{\text{сж}}$  - углы между осью  $z$  и осями растяжения и сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, а величина

$$W_1 = \gamma A M(K_0) \mu^{-1} f(\gamma) 10^{(C_2 - \gamma)(K_{\text{макс}} - K_0)}. \quad (1)$$

В этой формуле  $A$  - сейсмическая активность для единичного диапазона энергетического класса  $K_0$ ,  $M(K_0)$  - сейсмический момент, соответствующий энергетическому классу  $K_0$ ,  $\mu$  - модуль упругости на сдвиг,  $C_1$  и  $C_2$  - постоянные коэффициенты в соотношении

$$M(K_0) = 10^{C_1 + C_2(K - K_0)}. \quad (2)$$

От величин  $K_{\text{макс}}$  можно перейти к активности  $A$  по формуле [13]:

$$\lg A = C_3 + C_4(K_{\text{макс}} - K_0). \quad (3)$$

Постоянные коэффициенты в соотношениях (1-3) мало меняются от региона к региону. Например, постоянная  $C_2$  по статистике для мировых данных равна 0.9 [11], для Камчатки, Японии и Кавказа  $C_4$  изменяется в диапазоне 0.36-0.39 [11, 14].

На основе использования формул (1-3) рассчитана зависимость  $W$  (в относительных единицах), от параметров  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  применительно к Камчатскому региону, которая имеет вид  $W = B \alpha A^{3.47 - \gamma / 0.36}$ , где  $B$  является константой. Вывод этой формулы, сделанный в работе [16], ввиду ограниченности объёма данной статьи не приводится.

Оценим относительный вклад параметров  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  при оценке  $W$ . Для оценки влияния механизма очагов землетрясений была рассчитана зависимость изменения  $\alpha$  с глубиной [16] для взбросо-сдвиговых дислокаций, характерных для литосферы Камчатки по данным работы [1]. Выяснилось, что в интервале глубин 50-150 км эта величина меняется не более чем в 2 раза [16]. Для коровых землетрясений эти оценки не проводились.

Для тектонических землетрясений Камчатки и других регионов мира долговременное среднее значение  $\gamma$  варьирует, в основном, в диапазоне 0.44-0.48 с отклонением от среднего значения не более, чем на 10%. Приняв  $\gamma = 0.46$ , получим, что величина  $W$  может в первом приближении рассчитываться по формуле  $W = B \alpha A^{2.2}$ , т.е. зависимость  $W$  от  $A$  может считаться в первом приближении квадратичной. Согласно определению, величина сейсмической активности  $A$  по уровню  $K_0$  определяется числом землетрясений энергетического класса  $K_0$  в год на площади 1000 км<sup>2</sup> [12]. Поскольку значение  $N(K_0)$  прямо пропорционально величине  $N(K \geq K_0)$ , в дальнейшем мы используем параметр  $N(K \geq K_0) = N$  как более информативный. Тем самым, мы приходим к выводу, что величина  $W$  в относительных единицах может в первом приближении оцениваться по формуле

$$W = \alpha N^{2.2} \quad (4)$$

В работах [17-19] обращено внимание на то, что перед сильными камчатскими землетрясениями и вулканическими извержениями менее, чем за 1-2 месяца до их возникновения увеличивается не только число землетрясений с  $K \geq K_0$ , но меняется их суточный ход. Землетрясения в этот период происходят намного чаще в так называемом «активном» 12-часовом интервале 8-20 часов УТ. Суточный ход проявляется в диапазоне, охватывающем несколько порядков по энергии событий. В Тихоокеанском сейсмическом поясе по данным определений механизмов очагов землетрясений преобладает система

преимущественного сжатия, ориентированного вкост простирания основных тектонических структур [4]. Поэтому можно предположить, что накануне сильного землетрясения соответствующий сейсмоактивный объём находится в типичных для зон субдукции условиях сжатия, а более редкие события, регистрируемые в другой половине суток, происходят преимущественно в условиях растяжения. Смещение краёв этого «активного» интервала в ту или другую сторону для разных месяцев и лет, как правило, не превышает одного часа [18, 19].

Параметр  $N_1/N_2$  успешно использовался после 1995 года для прогноза (с временем упреждения менее двух недель) камчатских землетрясений с  $M \geq 6$  [18]. Эти результаты послужили основанием при оценке  $W$  учитывать суточную составляющую сейсмического процесса, т.е. ввести в формулу (4) вместо коэффициента  $\alpha$  функцию  $f(N_1/N_2, K_{\max} - K_0)$  которая, по нашему предположению, в той или иной степени учитывает как влияние механизмов очагов землетрясений, так и энергетику сейсмического процесса. Как уже отмечалось, если отношение  $N_1/N_2$  на некотором интервале больше единицы, то наблюдается преимущественное сжатие, если меньше единицы - растяжение. Поскольку диапазон вариаций  $W$  может изменяться на несколько порядков, удобнее использовать величину  $S = \lg W$ . Примем, что знак  $S$  определяется следующим образом. При  $N_1 = N_2$  сжатие и растяжение компенсируют друг друга ( $\lg N_1/N_2 = 0$ ), поэтому  $S = 0$ . При  $N_1 > N_2$  получим, что  $\lg N_1/N_2 > 0$ , поэтому  $S > 0$ . Наоборот, при  $N_2 > N_1$  величина  $S$  будет отрицательной. С учётом знака  $S$  для оценок логарифма скорости сеймотектонического движения предлагаются следующие формулы и условия их применения:

$$S = 0, \text{ если } N_1 = N_2 \quad (5)$$

$$S = \lg [(N_1 + N_2)^2 (N_1/N_2 - 1)^2 (K_{\max} - K_0)] \quad \text{при } N_1 > N_2 \quad (6)$$

$$S = -\lg [(N_1 + N_2)^2 (N_2/N_1 - 1)^2 (K_{\max} - K_0)] \quad \text{при } N_2 > N_1 \quad (7)$$

Так как деление на нуль невозможно, поэтому принято условие, что в формулах (5-7) при  $N_1$  или  $N_2$ , равном нулю, величины  $N_1$  и  $N_2$  одновременно увеличиваются на единицу. Принимается также условие, что выбор  $K_0$  определяется соотношением  $(K_{\max} - K_0) > 1.0$ .

Расчёты  $S$  проводились для сейсмоактивного района Южной Камчатки от мыса Лопатка на юге до мыса Шипунского на севере. Использовался оперативный каталог землетрясений Камчатского филиала ГС РАН. Рассматривались землетрясения с глубиной очагов меньше 60 км и энергетическими классами  $K \geq 8.4$ , рассчитанными для поперечных сейсмических волн. Афтершоки сильных событий исключались, кроме землетрясений с  $K \geq 10.0$ . Результаты расчётов параметра  $S$  по формулам (5-7) представлены на рис.1. Величина  $S$  для периода 27.06-16.10 2006 г. рассчитывалась во временных окнах длительностью 10 суток с шагом в одни сутки и относилась к середине окна.

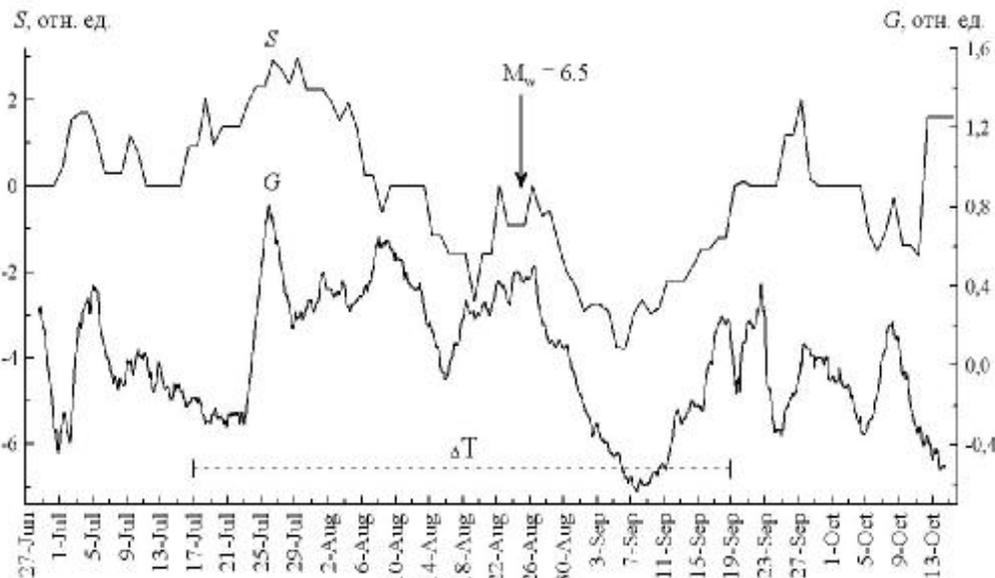


Рис.1. Поведение параметра  $S$  (логарифма скорости сеймотектонического движения) и  $G$  (разности стандартизованных среднечасовых значений градиента потенциала электрического поля между пунктами "Микижа" и "Паратунка"). Горизонтальной пунктирной линией обозначен интервал  $\Delta T$ , в течение которого 96% времени отсутствовали осадки.

Из рис. 1 видно, что с середины июля до 10 октября наблюдается чередование линейных трендов увеличения и уменьшения параметра  $S$ . Фазы сжатия и растяжения с середины июля до 10 октября сменяли друг друга. До конца июля величина  $S$  закономерно возрастала и достигла своего максимального значения за весь период наблюдений в последней пятидневке этого месяца. Затем в течение пяти недель происходило в целом уменьшение параметра  $S$  (фаза растяжения), осложнённое кратковременным увеличением  $S$  вблизи момента возникновения землетрясения 24 августа 2006 г. с  $M_w = 6.5$ . Таким образом, это землетрясение произошло после достижения параметром  $S$  своего максимального значения в фазе преимущественного растяжения литосферы Южной Камчатки. Сопоставление вариаций  $S$  с динамикой электрического поля проводится в разделе 3.

## **2. Методика анализа данных синхронных измерений электрического поля в приземном воздухе на пункте "Микижа" и обсерватории "Паратунка".**

Синхронные измерения электрического поля на двух и более пунктах используются в атмосферном электричестве для изучения пространственных структур вариаций поля и выделения структур, имеющих различные характерные масштабы и физическую природу. При удалении пунктов на 1-10 км друг от друга полученные данные содержат информацию о структуре метеобусловленных вариаций поля. При расстояниях между пунктами порядка нескольких сотен километров можно исследовать пространственную структуру неоднородностей поля, вызванных магнитосферными генераторами. Для выделения глобальных эффектов, обусловленных, в частности, влиянием гелиокосмических факторов, необходимы наблюдения с апертурой сети порядка тысяч километров [2, 5].

При выявлении аномальных возмущений приземного атмосферного электричества сейсмотектонической природы необходимо, на наш взгляд, учитывать следующее. Активизация сейсмотектонического процесса сопровождается воздействием на атмосферу крайне неоднородной и иерархично расчлененной земной коры, особенно вблизи поверхности. Воздействие протекает наиболее интенсивно на границе земля-атмосфера, где значительны потоки массы и энергии [3, 8]. Поэтому реакция приземного атмосферного электричества, в том числе электрического поля, должна быть в разных местах разной, что может привести к появлению пространственной структуры вариаций электрического поля. Учитывая это, целесообразно проводить синхронную регистрацию поля на двух и более пунктах [10, 20].

При сравнении атмосферного электрического поля на двух и нескольких пунктах рассматривается разность одновременных значений градиента потенциала (напряженности) поля, которая имеет размерность В/м. Применяется также сравнительный анализ особенностей поведения этой характеристики поля. В настоящей работе использована новая методика анализа данных синхронных измерений электрического поля, проведенных на двух пунктах.

С 27 июня по 16 октября 2006 г. на пункте "Микижа" и наблюдательном пункте обсерватории "Паратунка" синхронно регистрировался градиент потенциала  $V'$  электрического поля в приземном воздухе. Измерения  $V'$  осуществлялись электростатическими флюксметрами "Поле-2" [7]. Рассматривались данные, полученные в условиях любой погоды. Атмосферные осадки на пункте "Микижа" регистрировались с использованием метеостанции Conrad WS-2300. Исходные данные получены коллективом исследователей (см. доклад Ю.В. Марапульца, О.П. Руленко, М.А. Мищенко в настоящем сборнике).

На рис. 2 представлены сглаженные методом скользящего среднего во временном окне 72 часа среднечасовые значения градиента потенциала  $V'$  на пунктах "Микижа" и "Паратунка". Сглаживание позволяет удалить возмущения  $V'$ , вызванные кратковременными (менее трех суток) ухудшениями погоды. Предполагается, что на

интервалах такой длительности существенных изменений перестройки поля сейсмотектонических напряжений не происходит.

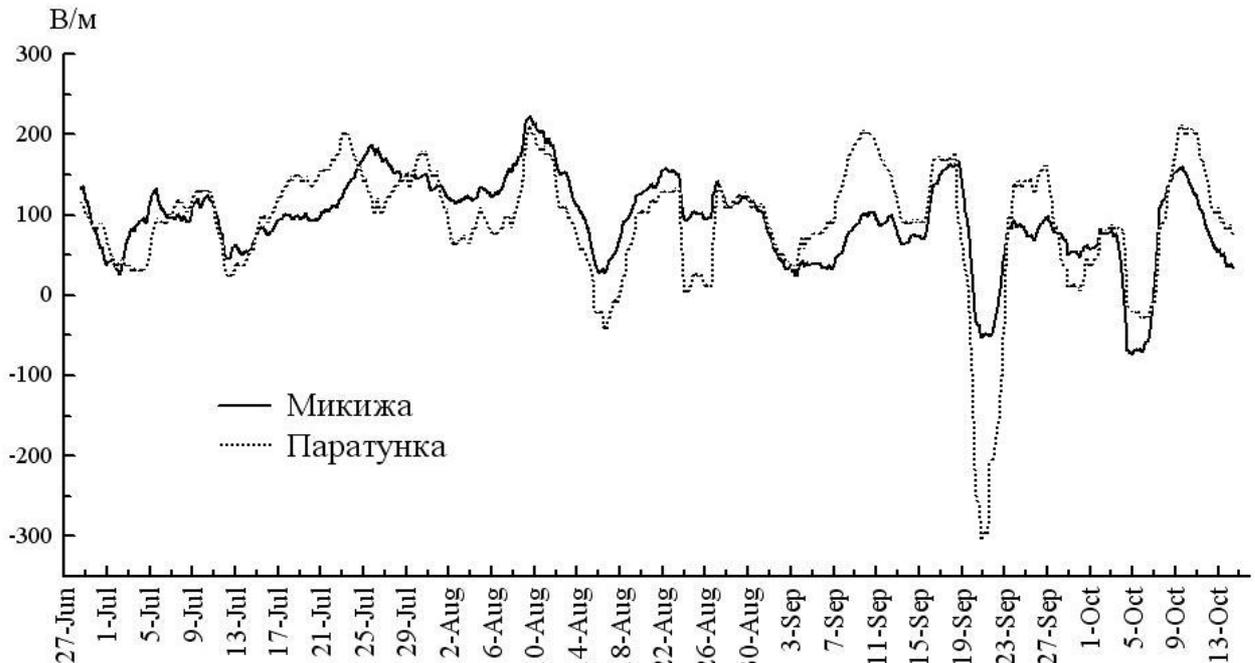


Рис.2. Сглаженные методом скользящего среднего во временном окне 72 часа среднечасовые значения градиента потенциала электрического поля на пунктах "Микижа" и "Паратунка".

Как видно на рис. 2, сглаженные значения  $V'$  на пунктах хорошо коррелируют между собой. Коэффициент линейной корреляции равен 0.71 с уровнем значимости меньше, чем 0.001. Однако в отдельные периоды времени значения  $V'$  на пункте "Микижа" становятся больше или меньше, чем на пункте "Паратунка". Учитывая расстояние между пунктами, это можно объяснить различием в интенсивности локальных электрических генераторов, что обусловлено неодинаковой изменчивостью приземной атмосферы. Как будет показано ниже, более информативным параметром при рассмотрении пространственной структуры вариаций электрического поля является разность стандартизованных значений  $V'$  на пунктах.

На пункте "Микижа" измерения  $V'$  осуществлялись на высоте 7 см от поверхности земли, а на пункте "Паратунка" они проводились на высоте 3.4 м с использованием металлической выравнивающей сетки. Учитывая топографию местности, значения  $V'$  на пункте "Микижа" можно считать абсолютными значениями. На пункте "Паратунка" они получены в искусственно усиленном электрическом поле и в других топографических условиях. В таком случае для сравнения результатов измерений между пунктами данные по  $V'$  на пункте "Паратунка" следует привести к абсолютным значениям. Однако, используемый при этом коэффициент редукции, который определяется экспериментально, не остается постоянным, а зависит от наличия вблизи земли объемных электрических зарядов [15] и атмосферного электрического поля [9]. Вместе с отличием в топографии местности это затрудняет сравнение данных между пунктами по указанной схеме.

Учитывая сказанное, представляется целесообразным стандартизовать последовательности среднечасовых значений  $V'$  на пунктах, затем определить их разность и провести далее сглаживание. Стандартизация случайной величины состоит из центрирования и нормирования. Математическое ожидание стандартизованной случайной величины равно нулю, а ее дисперсия - единице. Применительно к нашему случаю центрирование среднечасовых значений  $V'$  в значительной степени устраняет усиление электрического поля, обусловленное установкой флюксметра на некоторой высоте, что особенно важно для пункта "Паратунка". Последующее нормирование приводит к безразмерным величинам, использование которых упрощает сравнение результатов,

полученных в разных условиях на разных пунктах. Стандартизируя случайную величину, мы добиваемся относительно слабой компактности ее распределения путем линейного преобразования [6].

На рис. 1 одновременно с параметром  $S$  дано поведение параметра  $G$ , который представляет сглаженную методом скользящего среднего во временном окне 72 часа разность стандартизованных среднечасовых значений градиента потенциала электрического поля между пунктом "Микижа" и "Паратунка".

### 3. Анализ результатов и выводы.

Для выяснения связи между параметрами  $S$  и  $G$  за весь период наблюдений оценен коэффициент корреляции суточных значений этих параметров ( $r_1 = 0.39$ , уровень значимости  $p_1 < 0.001$ ). На интервале  $\Delta T$  (рис.1) были преимущественно невозмущенные погодные условия, так как осадки наблюдались только 4% времени. Для этого интервала, который составляет 59% от периода наблюдений, коэффициент корреляции значительно выше ( $r_2 = 0.55$ ,  $p_2 < 0.001$ ). Значимое различие  $r_1$  и  $r_2$  указывает на уменьшение тесноты линейной связи между параметрами  $S$  и  $G$  при плохой погоде. Следовательно, рассматриваемые параметры, характеризующие динамику процессов в литосфере и приземной атмосфере, линейно связаны. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии процессов в литосфере (параметр  $S$ ) на динамику электрического поля в приземном воздухе (параметр  $G$ ).

Из рис. 1 видно, что по времени практически совпадают 2 главных экстремума для обоих параметров: максимальные  $S_+$  и  $G_+$  (26-27 июля) и минимальные  $S_-$  и  $G_-$  (6-8 сентября). Другая общая особенность состоит в том, что накануне землетрясения 24 августа с  $M_w = 6.5$  в течение длительного времени наблюдались только положительные значения как для параметра  $S$  (аномалия  $S_+$  в период 15 июля-8 августа), так и для параметра  $G$  (аномалия  $G_+$  в период 24 июля-15 августа). На наш взгляд, положительные аномалии  $S_+$  и  $G_+$  могут рассматриваться в качестве краткосрочных предвестников этого сильного сейсмического события. Землетрясение произошло примерно через две недели после окончания аномалии  $S_+$ .

Сформулируем основные результаты проведенных исследований.

1. Разработаны новые методики оценки логарифма скорости сеймотектонического движения (параметр  $S$ ) и выявления пространственной структуры вариаций электрического поля в приземном воздухе с использованием регистрации на двух пунктах (параметр  $G$ ). Методики апробированы на примере наблюдений в районе Южной Камчатки в июне-октябре 2006 г.

2. Впервые для вариаций параметров  $S$  и  $G$  обнаружена статистически значимая линейная корреляция. Таким образом, эти параметры связаны между собой и отражают динамику перестройки поля тектонических напряжений в исследуемой части зоны субдукции Камчатки.

3. Землетрясение 24 августа 2006 г. с  $M_w = 6.5$ , произошедшее в районе Южной Камчатки, предварялось краткосрочными, со временем упреждения 1-2 недели, предвестниковыми аномалиями параметров  $S$  и  $G$ , выявленными при ретроспективном анализе данных.

4. Полученные результаты свидетельствуют о взаимосвязи исследуемых геофизических процессов, протекающих в различных геосферных оболочках, и существенном влиянии процессов в литосфере на динамику электрического поля в приземном воздухе.

Авторы признательны д.-ф.м.н. Б.М. Шевцову, к.т.н. Ю.В. Марапультцу за содействие в организации и проведении атмосферно-электрических наблюдений.

Работа поддержана в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, гос. контракт № 10104-34/П-16/041-404/310506-014 и грантов ДВО РАН 06-I- П16-070 и 06 III А-08-336.

### Список литературы

1. Аверьянова В.Н. Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока. – М. : Наука, 1968. – 192 с.
2. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. – 137 с.
3. Адушкин В.В., Спивак А.А. Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земная кора-атмосфера // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 1. С. 92-97.
4. Балакина Л.М., Введенская А.В, Голубева Н.В. и др. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – М. : Наука, 1972. – 180 с.
5. Бандилет О.И., Канониди Х.Д., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. Пространственно-временная структура вариаций  $E_z$  в высокоширотной зоне // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. – М. : ОИФЗ РАН, 2000. С. 33-36.
6. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М. : Большая Российская энциклопедия. 1999. – 910 с.
7. Гордюк В.П. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы // Труды ГГО. 1981. Вып. 442. С. 96-102.
8. Гохберг М.Б. Взаимодействие процессов в литосфере и у земной поверхности с внешними оболочками Земли // Геофизика на рубеже веков. – М. : ОИФЗ РАН, 1999. С. 163-169.
9. Куповых Г.В., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. К вопросу определения коэффициента редукиции при измерении атмосферного электрического поля в приэлектродном слое // Труды ВГИ. – М. : Гидрометеиздат, 1989. Вып. 76. С. 66-69.
10. Моргунов В.А., Матвеев И.В., Статиев А.В. Электричество атмосферы в зоне тектонического разлома // Магнитосферные исследования № 15. – М. : ВИНТИ, 1990. С. 65-68.
11. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Землетрясения и геолого-геофизические поля. Изд-во Инст. геофизики АН Груз. ССР. Тбилиси : 1975. С. 21-30.
12. Ризниченко Ю.В. Расчёт скорости деформации при сейсмическом течении горных масс. Земли. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 10. С. 35-46.
13. Ризниченко Ю.В. Джибладзе Э.А. Определение максимальных возможных землетрясений по комплексным данным для Кавказа. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 5. С. 32-40.
14. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 9. С. 28-41.
15. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 421 с.
16. Широков В.А. О связи извержений вулканов с тектоническими землетрясениями Камчатки. Автореферат канд. диссертации. – М. : 1980. – 19 с.
17. Широков В.А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 40-55.
18. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений с магнитудой  $M = 6-7.8$  по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петр.-Камч. 2001. С. 95-116.
19. Широков В.А., Кузьмин Ю.Д. О суточной цикличности вулканических землетрясений в Курило-Камчатской зоне // Вулканология и сейсмология. 1988. № 5. С. 92-99.
20. Bufe C., Nanevicz J. Atmospheric electric field observations, animal behavior, and earthquakes // Pros. EHRP Conf. I. 23-24 Sept. 1976. California. P. 95-106.